

LA FECHA DE MATADO COMO CLAVE DEL ÉXITO DE LOS CULTIVOS CUBIERTA

M. Alonso-Ayuso¹, J.L. Gabriel¹, M. Quemada¹

¹Departamento de Producción Agraria, ETSI Agrónomos, Universidad politécnica de Madrid, Av. Ciudad Universitaria, 28019, Madrid.
maria.alonso.ayuso@gmail.com; joseluis.gabriel@upm.es; miguel.quemada@upm.es

RESUMEN. Una de las críticas realizadas a los cultivos cubierta (CC) es la competición por los recursos que puede producirse con el cultivo principal que se establece después. Se realizó un ensayo para estudiar el efecto de la fecha de matado del CC sobre el contenido de agua y nitrógeno (N) del suelo. Los tratamientos comparados fueron el barbecho y un CC sembrado en octubre y matado en dos fechas en primavera. Se estudiaron numerosas variables relativas a la biomasa del CC y su composición, el N inorgánico. Se midió diariamente la humedad del suelo hasta 1.2 m de profundidad en intervalos de 0.2 m. El riesgo de competición por agua y nutrientes se redujo con la fecha de matado temprana, que conservó el agua de lluvia entre ambas fechas y permitió más tiempo para la liberación de N. La fecha de matado resultó ser crucial para optimizar los beneficios derivados de los CC y minimizar sus posibles desventajas.

ABSTRACT. Competition for essential resources with the subsequent crop is a potential negative effect of cover crops (CC). An experiment was conducted to study the effect of cover crop kill-date on soil water and nitrogen (N) content. Treatments were fallow and a CC mixture sown in October and killed on two different dates in spring. Variables concerning CC biomass and its composition, and inorganic N, were determined. Soil water content was monitored daily to a depth of 1.2 m, in 0.2 m interval. The early kill date decreased the risk of water and N pre-emptive competition by preserving rain harvested between kill dates, and allowed more time for N release in spring. Kill date proved to be a crucial tool to optimize CC benefits and minimize its disadvantages.

1.- Introducción

La sustitución del barbecho por cultivos cubierta (CC) en sistemas agrícolas permite obtener numerosas ventajas medioambientales (Tonitto *et al.* 2006): pueden mejorar la estabilidad de agregados de suelo, la capacidad de retención de agua, aportar nutrientes, o suprimir enfermedades. Además, los residuos que cubren el suelo tras el matado pueden proteger mejor al suelo frente a la erosión y ayudar al control de flora arvense, así como conservar la humedad del suelo (Thorup-Kristensen *et al.* 2003). Sin embargo, un manejo inapropiado de los CC puede tener efectos negativos sobre el cultivo comercial que se establece después, como podría ser una posible competición por agua y nutrientes (Stipesevic y Kladienko, 2005). La elección de la fecha de matado o terminación de los CC es un factor de manejo

crucial para determinar su éxito (Benincasa *et al.* 2010). Experimentos previos han mostrado cómo un retraso en dicha fecha de tan solo varias semanas en primavera puede tener un efecto importante en la competición por agua y N con el cultivo que se establece después, en el control de nitrato lixiviado y en la conservación de la humedad (Clark *et al.* 2007). Sin embargo, sigue sin haber consenso en cuanto a las ventajas y limitaciones de posponer el matado; por lo que un mejor entendimiento del efecto del CC y de sus residuos en las dinámicas de agua y N podría mejorar nuestra habilidad para elegir una fecha de matado y maximizar así los beneficios de los CC en el sistema.

El efecto de la fecha de matado en la disponibilidad de agua en el suelo se basa en el balance entre el agua extraído por el CC durante su desarrollo y la evaporación prevenida por el residuo que queda sobre la superficie a modo de mulch. Algunos autores han observado que a pesar de una mayor extracción de agua en el suelo por parte de los CC al retrasar el matado en primavera, sería compensable debido a la conservación de la humedad por el residuo (Clark *et al.* 2007). Sin embargo, otros experimentos mostraron que cuando las precipitaciones son bajas, la conservación de humedad del suelo debido al mulch no compensaría la extracción de agua del suelo al retrasar el matado del CC, pudiendo tener un efecto negativo en el rendimiento del cultivo comercial que se establece después (Krueger *et al.* 2011). De la misma manera, el posponer dicha fecha de matado potenció la competición por N al agotarse el suelo por la extracción del CC y una lenta liberación debido al elevado ratio C/N del residuo (Thorup-Kristensen *et al.* 2003). Las especies de leguminosas podrían compensar este efecto fijando más N₂ cuando se retrasara el matado (Tosti *et al.* 2012). Los balance de agua y N dependen de varios factores, todos ellos afectados por la fecha de matado, como son por ejemplo, la acumulación de biomasa aérea, la cobertura del suelo, o la extracción de N. La composición química de los residuos, como el contenido en fibra o el ratio C/N son igualmente importantes pues influyen en la descomposición del residuo y determinarán su persistencia al cubrir el suelo como un mulch (Waggoner *et al.* 1998).

Un estudio combinado del crecimiento de CC, de la cobertura del suelo, y de las dinámicas de agua y N contribuiría a un mejor entendimiento del efecto de la fecha de matado y permitiría mejorar las prácticas de manejo de los CC. Este experimento se llevó a cabo durante dos años para estudiar el efecto de la fecha de matado en los siguientes factores: (i) crecimiento y contenido de N del CC; (ii) composición química y

calidad del residuo del CC; (iii) dinámica de N inorgánico del suelo y N potencialmente mineralizable; y (iv) contenido de agua del suelo.

2.- Material y métodos

2.1.- Localización. Diseño experimental

El ensayo tuvo lugar entre octubre de 2011 y noviembre de 2013 en la estación experimental de La Chimenea (40°03'N, 03°31'W, 550 msnm), ubicada en la cuenca del río Tajo, en Aranjuez (Madrid). La clase textural del suelo es franco-arcillo-limosa (Soil Survey Staff, 2014) con un elevado contenido en materia orgánica y carbonatos, y un pH de 7,5. El clima es semiárido mediterráneo (Papadakis, 1966) con una alta variabilidad interanual (Fig. 1). Los datos meteorológicos se registraron durante todo el periodo experimental.

El experimento consistió en doce parcelas (15 m x 12 m) asignadas al azar, de tres tratamientos (barbecho y dos fechas de matado del CC) con cuatro repeticiones. El tratamiento de CC consistió en una mezcla de 30% de cebada (*Hordeum vulgare* L., cv Vanessa; 53 kg ha⁻¹) y un 70% de veza (*Vicia villosa* L., cv Vereda; 45 kg ha⁻¹) sembrado a mano a principios de octubre (06/10/2011; 08/10/2012). Todos los tratamientos recibieron 18 mm de riego en la fecha de siembra con un sistema de riego por aspersión (9,5 mm h⁻¹) con el fin de asegurar un establecimiento uniforme. La primera fecha de matado (PF) ocurrió a mediados de marzo (13/03/2012; 14/03/2013), cuando la cebada estaba al final de la etapa de comienzo de espigado y la veza en la etapa de elongación del tallo. En las parcelas de segunda fecha de matado (SF), el CC se mató a mediados de abril (09/04/2012; 13/04/2013), cuando la cebada estaba en la etapa de crecimiento de la inflorescencia emergente y la veza en etapa de elongación del tallo (Tabla 1). El matado consistió en la aplicación de glifosato (N-fosfonometilglicina, 2%) seguido por un pase de segadora. El último día de abril fue elegido como fecha de siembra hipotética (FHS) para ambos años, ya que es una fecha típica para la siembra de cultivos comerciales de verano en la zona. El FHS representa el comienzo del periodo de "mulch", durante el cual el residuo del CC permaneció en el suelo. Para comparar el efecto del residuo como acolchado sobre la conservación del agua en el suelo (CAS) se homogeneizó mediante la adición de agua a las parcelas más secas (30,5 mm a en PF y 35,5 mm en la SF) en abril de 2012. Debido a que las precipitaciones fueron abundantes en marzo de 2013, no se añadió agua.

El experimento se realizó en un campo cultivado con triticale durante los dos años anteriores y que no recibieron enmiendas orgánicas o fertilizante nitrogenado durante cuatro años previos al ensayo.

Tabla 1. Fechas relevantes del ensayo

	campaña 2011-2012	campaña 2012-2013
Siembra del CC	06.10.2011	08.10.2012
Emergencia del CC	13.10.2011	15.10.2012
1ª fecha de matado (PF)	13.03.2012	14.03.2013
2ª fecha de matado (SF)	09.04.2012	10.04.2013

2.2.- Cobertura del suelo (CS) y biomasa del CC

Para medir la biomasa aérea y la CS en cada parcela, se marcaron cuatro cuadrados de 0.5 m x 0.5 m después de la siembra de la CC. Cada dos semanas se tomaron imágenes de la cobertura y posteriormente fueron analizadas con el programa SigmaScan Pro® (Systat Software Inc, Chicago, IL, EE.UU.), basado en colorimetría (Richardson *et al.* 2001). La evolución de la CS se ajustó a la función de Gompertz (Bodner *et al.* 2010), y se calcularon los grados-días acumulados (° C d) hasta que la CS alcanzó el 30% (t₃₀) y el 80% (t₈₀).

Previo al matado, la biomasa aérea de los cuadrantes se cortó, se secó en un horno a 65°C, y se pesó. La concentración de C y N en la biomasa aérea se determinó para cada submuestra de cada especie en cada parcela. La fijación del N₂ atmosférico por la leguminosa se estimó mediante el método de abundancia natural (Unkovich *et al.* 2012). La calidad del residuo para cada especie y en cada parcela, se evaluó mediante la estimación de fibra neutro detergente (FND), fibra ácido detergente (FAD) y lignina (L) (Goering y Van Soest, 1970).

2.3.- Contenido de N inorgánico en el suelo (N_{min})

Cuatro muestras de suelo fueron tomadas en cada parcela a una profundidad de 1.2 m, en intervalos de 0.2 m, con una barrena, justo antes de la siembra de la CC, después de la segunda fecha de matado de cada año, y al final del experimento. Se realizaron extracciones para cada submuestra con KCl 1M que posteriormente fueron analizados para la determinación de concentración de nitrato y amonio (Keeney *et al.* 1982; Crooke, 1971).

2.4.- Mineralización potencial de nitrógeno del suelo (N₀)

La mineralización potencial de nitrógeno del suelo se estimó adaptando el procedimiento de incubación aerobia propuesto por Stanford y Smith (1972).

El N₀ y la tasa de mineralización constante (k) se estimaron después de ajustar un modelo de regresión exponencial ($N_t = N_0 \exp(kt)$) para describir el N mineralizado acumulado (N_t) con el tiempo (t) en cada muestra de suelo.

2.5.- Contenido volumétrico de agua en el suelo (CAS)

El CAS se registró diariamente durante el ensayo de campo usando la sonda de capacitancia EnviroScan®

(Sentek Pty Ltd, Stepney, Australia). Las lecturas del sensor se automatizaron y se almacenaron en un registrador de datos, descargándose semanalmente. Para garantizar la fiabilidad de la medición, se llevó a cabo un procedimiento de normalización y calibración previo (Gabriel *et al.* 2010). El conjunto de datos de CAS se compuso de dos temporadas de CC, que comenzaron antes de la siembra en octubre y duró hasta agosto de cada año, y se utilizó para estudiar el efecto de la CC y de sus residuos como mulch en la humedad del suelo.

2.6.- Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) para cada variable, aplicando un test post-hoc de Tukey con un nivel de probabilidad de 0.05 ($P \leq 0,05$). El modelo de Gompertz se ajustó a la C y la mineralización potencial de N se ajustó a la mineralización acumulada N utilizando un procedimiento de regresión no lineal.

3.- Resultados

3.1.- Condiciones climáticas

El primer año experimental fue más seco que el segundo (Fig. 1). En el primer año, la precipitación fue sustancialmente inferior (298 mm) que la del promedio de 30 años, mientras que en el segundo, fue superior (408 mm). Las diferencias se produjeron principalmente en primavera; de marzo a mayo. El resto de la temporada fue bastante similar en ambos años a excepción de precipitaciones intensas a finales de septiembre de 2012.

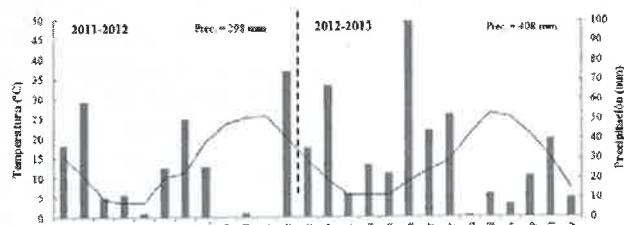


Fig. 1. Precipitación mensual y temperatura media, observadas durante las dos campañas (2011-2012; 2012-2013) del ensayo

3.2.- Cobertura del suelo, biomasa aérea y contenido de N

La CS siguió un modelo de Gompertz clásico (Fig. 2). La primera fecha de matado ocurrió entre 157 y 159 días después de la siembra ($\sim 1200^\circ\text{C d}$) mientras que la segunda se produjo entre 184 y 186 días después de la siembra ($\sim 1500^\circ\text{C d}$). Se observaron diferencias en la CS máxima alcanzada: 85% en 2012 y 100% en 2013. Ambos años, la máxima CS fue alcanzada en la primera fecha. El suelo continuó cubierto por el residuo del CC más de seis meses después del matado.

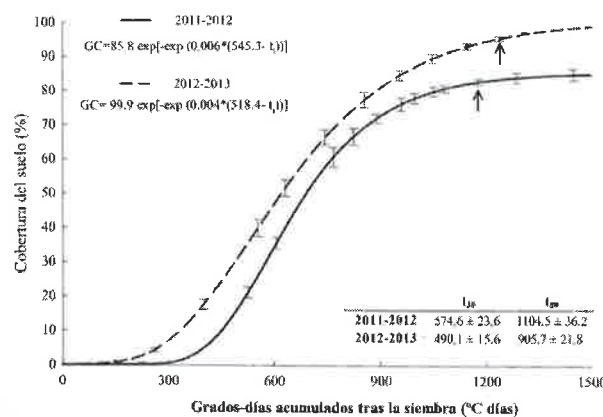


Fig. 2. Evolución de la cobertura del suelo (CS) durante los periodos de crecimiento del cultivo cubierta. Las flechas señalan el momento de matado. Las líneas muestran el modelo de Gompertz ajustado a los valores observados. Se muestran los modelos ajustados así como los tiempos térmicos hasta que la CS alcanza el 30% y 80% de cobertura.

La biomasa aérea se incrementó desde PF a la SF aproximadamente 2000 kg ha^{-1} , debido principalmente al incremento de la cebada (Fig. 3). Sin embargo, no se encontraron diferencias en la biomasa de veza entre las fechas de matado. Al final del periodo de mulch, la cantidad de residuo que quedó en la superficie del suelo era mayor en la SF que en el tratamiento de PF. Para ambos tratamientos, el suelo quedó completamente cubierto.

La concentración de N en la biomasa aérea fue mayor en la PF que en la SF. La concentración en la mezcla disminuyó de 2,7 hasta 2,3% en 2012 y de 3,2 a 2,6% en 2013. Como era de esperar, la veza tuvo una concentración mayor que la cebada. Las diferencias en el contenido de N entre PF y SF, calculado como el producto de la biomasa aérea y la concentración de N, no fueron significativas para la mezcla o la veza (Fig. 3). Sin embargo, el contenido de N en la cebada en SF fue mayor que en PF: la absorción de N aumentó desde 79 hasta 107 kg N ha^{-1} en 2012, y $97\text{-}115 \text{ kg N ha}^{-1}$ en 2013. La veza alcanzó elevadas tasas de fijación de N_2 atmosférico durante el experimento. En la primera temporada, la fijación de N_2 atmosférico fue superior al 80% y de 100% en la segunda. Sin embargo, no se encontraron diferencias entre las fechas de matado.

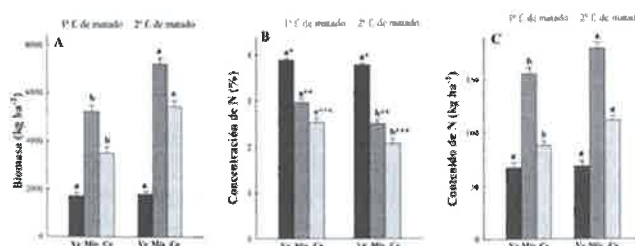


Fig. 3. Biomasa (A), concentración de N (B) y contenido de N (C) para la veza (Ve), cebada (Ce) y mezcla (Mix) medidos para la primera y segunda fecha de matado. Los valores son la media de los dos años de ensayo. Las letras sobre las barras indican diferencias entre las fechas de matado para cada especie; los asteriscos indican diferencias entre especies para cada fecha de matado.

Las fracciones de calidad del residuo entre ambas fechas variaron significativamente (Fig. 4). Las fracciones FDN y FAD se incrementaron al retrasar la fecha de matado. Las diferencias en la fracción de lignina sólo fueron significativas en la cebada y la mezcla en 2012. La relación C/N de los residuos fue siempre inferior para PF que para SF.

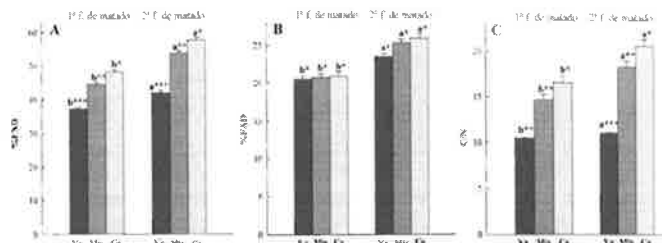


Fig. 4. Fracciones de fibra neutro detergente (A), y de fibra ácido detergente (B) y ratio C/N (C) para la veza (Ve), cebada (Ce) y mezcla (Mix) medidos para la primera y segunda fecha de matado. Los valores son la media de los dos años de ensayo. Las letras sobre las barras indican diferencias entre las fechas de matado para cada especie; los asteriscos indican diferencias entre especies para cada fecha de matado.

3.3.- Nitrógeno inorgánico en el suelo (N_{min})

Al principio del experimento, la cantidad total de N_{min} en el perfil era 145 kg N ha^{-1} , ubicado principalmente en la capa superficial (Fig. 5). Durante el primer período de CC, el N_{min} del suelo aumentó en el tratamiento de barbecho, en particular en la parte superior, mientras que disminuyó en el resto de tratamientos. Durante el período de mulch, el N_{min} del suelo en el tratamiento de barbecho aumentó ligeramente, mientras que, en los tratamientos de CC, se incrementó en gran medida en las capas superiores del suelo; aunque no se observaron diferencias entre los tratamientos de CC.

Durante el segundo período de crecimiento del CC, el N_{min} suelo disminuyó en todos los tratamientos. Después del matado del CC en abril de 2013, el N_{min} fue de 84 kg N ha^{-1} en el tratamiento SF y de 140 kg N ha^{-1} en los demás. El tratamiento PF acumuló más N_{min} en las capas superiores, debido probablemente a una temprana mineralización que se produjo entre la fecha de matado y el muestreo de suelo (4 semanas). Al final del período de mulch en noviembre de 2013, se produjo un gran aumento en N_{min} suelo en todos los tratamientos. No se observaron diferencias en N_{min} acumulado en el perfil del suelo ($\sim 245 \text{ kg N ha}^{-1}$), pero sí en la distribución en profundidad. En la SF, la mayoría del N_{min} ($\sim 70\%$) se ubicó en la capa superior (0-40 cm), mientras que solo el 29% estaba en la capa superior en el tratamiento de barbecho. Del mismo modo, mientras que más del 40% de N_{min} suelo estaba ubicado en la capa inferior en el barbecho, solo menos del 16% estaba en la capa inferior en SF. La distribución de N_{min} en el tratamiento de PF se situó entre los otros dos tratamientos.

3.4.- Mineralización de N potencial en el suelo

El N_0 fue mayor en los suelos del tratamiento de SF (34 mg N kg^{-1} de suelo) que en los del barbecho (24 mg N kg^{-1} de suelo). El N_0 del tratamiento de PF tuvo un valor

intermedio. No se observaron diferencias entre los tratamientos para el valor de la tasa de mineralización.

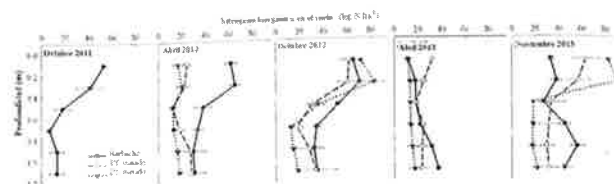


Fig. 5. Nitrógeno inorgánico (kg N ha^{-1}) en el perfil del suelo hasta 1.2 m de profundidad para los tratamientos de barbecho, y primera y segunda fechas de matado, en los diferentes momentos de muestreo.

3.5.- Contenido de agua del suelo

El contenido de agua del suelo se vio afectado por la presencia de CC y por la fecha de matado (Fig. 6). Durante ambos períodos de crecimiento del CC, el CAS siguió un patrón similar. En el momento de siembra, los tres tratamientos comenzaron con un bajo CAS en todo el perfil (220 mm) en ambas temporadas, apareciendo sólo pequeñas diferencias en las capas superiores. La precipitación durante los tres meses siguientes a la siembra CC recargó el perfil del suelo, alcanzando un CAS superior a 300 mm en 2013 debido a las abundantes lluvias (Fig. 6a). No se observaron diferencias entre los tratamientos durante este período. Sin embargo, durante los siguientes tres meses, el CC extrajo el agua de los horizontes superiores, y en el momento de la primera fecha de matado, el CAS fue superior en el barbecho que en los tratamientos de CC. Tras esa primera fecha, el CAS en el tratamiento de PF varió con respecto a la SF dependiendo de las condiciones climáticas anuales: durante la primera temporada, no se observaron diferencias entre los tratamientos PF y SF, probablemente debido a la baja precipitación y en el momento de la segunda fecha de matado, ambos presentaron un CAS similar y superiores al barbecho. En cambio durante la segunda temporada, la alta precipitación que tuvo lugar entre ambas fechas matar recargó el perfil del suelo, y para el tratamiento PF, el CAS fue similar a la de barbecho, excepto en el horizonte más profundo del suelo (100-120 cm, Fig. 6e) donde el tratamiento de barbecho se mantuvo húmedo. Para la segunda fecha de matado de 2013, el CAS en el tratamiento SF fue menor, y las diferencias con la PF fueron evidentes hasta 80 cm, y hasta 120 cm con el barbecho.

Durante los períodos de mulch, aparecieron diferencias iniciales en la dinámica de CAS entre ambos años, pero al final se observó un patrón similar. Después de la aplicación del agua en abril de 2012, el CAS en el perfil entero en el FHS fue similar en todos los tratamientos ($\sim 262 \text{ mm}$). Durante los ciclos de humedad/secado que se produjeron en primavera y verano, los tratamientos de CC siempre retuvieron más humedad que en el barbecho, mostrando así la capacidad del mulch para reducir las pérdidas por evaporación de agua (Fig. 6). Aunque se observó una desecación más lenta en los tratamientos con

CC, no se apreciaron diferencias entre los tratamientos a finales de septiembre. En 2013, no se aplicó riego, y el CAS en todo el perfil del suelo fue menor para la SF que en los tratamientos de PF y de barbecho en la FHS. En este momento, no se observaron diferencias en CAS entre los tratamientos de PF y el tratamiento de barbecho en todo el perfil del suelo. Sin embargo, la capa superior de PF estuvo más húmeda que en el barbecho debido a la reducción de la evaporación del agua del suelo causada por el mulch de residuos (Fig. 6b). Durante el verano, las pérdidas de agua en la capa superior fueron superiores en el barbecho que en los tratamientos de CC, mostrando así el efecto del mulch. Al final del experimento, no se detectaron diferencias en el CAS para la totalidad del perfil, pero algunos horizontes superficiales de SF permanecieron más secos como resultado del agotamiento del agua causado por la extracción del CC durante su crecimiento.

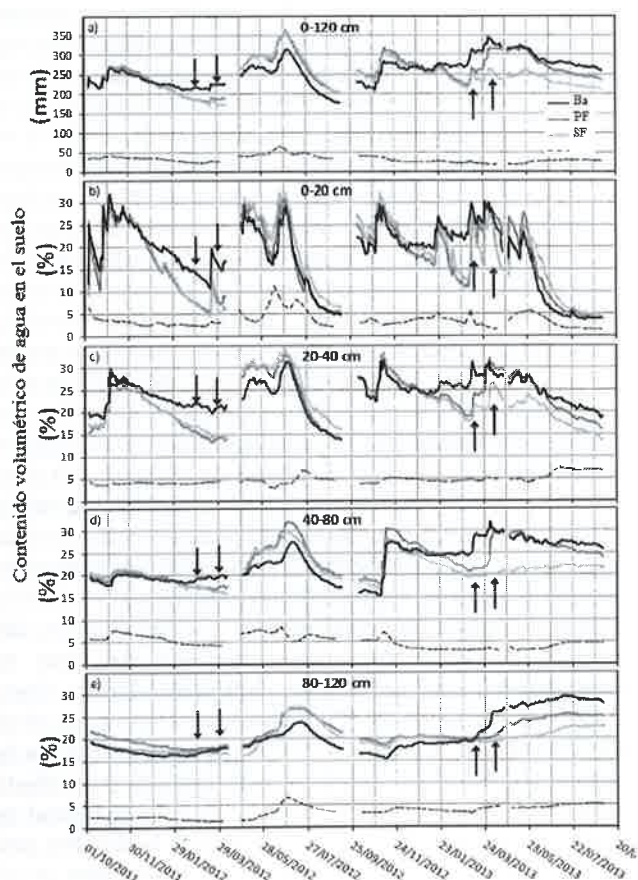


Fig. 6. Contenido de agua del suelo observado utilizando sensores de capacitancia a diferentes profundidades para los tratamientos de barbecho (Ba), y primera fecha (PF) y segunda fecha (SF) de matado del cultivo cubierta.

4.- Discusión

El estudio confirmó que la fecha de matado tiene un efecto importante sobre factores clave del sistema suelo-planta, por lo que es un factor clave importante para el manejo de los CC (Alonso-Ayuso *et al.* 2014).

El retraso de la fecha de matado no aumentó la CS. Las diferencias observadas en la cubierta máxima alcanzada cada uno de los años son debidas a las diferencias en precipitación de cada uno de ellos. Nuestros resultados coinciden con los de los investigadores que mostraron la capacidad de la función de Gompertz asintótica para capturar las características de la evolución de la CS de varios CC (Ramírez-García *et al.* 2014). La CS es una variable importante utilizada en estudios relacionados con la erosión del suelo, la evaporación, el control de malas hierbas o la intercepción de radiación (Bodner *et al.* 2010). En el presente estudio, la CS varió con las condiciones meteorológicas estacionales: la estación seca 2011-2012 fue menos favorable para el crecimiento de CC que en la estación húmeda y suave del 2012-2013. En ambas temporadas, la CS fue superior al 80% ya se alcanzó en la fecha PF, así que no hay beneficios adicionales en términos de erosión del suelo o de control de malas hierbas al retrasar la fecha de matado.

Como era de esperar, el retraso de la fecha de matado aumentó la biomasa aérea de la mezcla. El aumento se debió principalmente a la cebada. La relación cebada/veza, fue de 3: 7, pero la cebada tuvo mayor competencia debido a su tasa de crecimiento rápida (Ramírez-García *et al.* 2012). Una posible explicación para el gran predominio de cebada en nuestro estudio es que el N disponible en el suelo no fue un factor limitante (Ofori *et al.* 1987). Esta hipótesis es corroborada por los resultados obtenidos en el N tanto en planta como en suelo de nuestro estudio: la mayor parte del contenido de N en la mezcla de veza/cebada se acumuló antes de la fecha de PF. Se esperó que la veza fijara una cantidad significativa de N_2 entre ambas fechas (Tosti *et al.* 2012) pero no se observó un aumento en el contenido de N en la veza, de acuerdo con los resultados de Benincasa *et al.* (2010). La mayoría de los autores han encontrado que el contenido de N en mezclas de CC aumentó con el retraso del matado (Clark *et al.* 1997; Tosti *et al.* 2012), pero nuestros resultados mostraron que el principal efecto de retrasar la fecha de matado fue aumentar la biomasa aérea en lugar del contenido de N.

El efecto en la composición química de los residuos coincidió con resultados obtenidos por otros autores (Benincasa *et al.* 2010; Krueger *et al.* 2011). La concentración de N disminuyó de la primera a la segunda fecha de matado, siendo mayor para la veza. En las muestras de PF, la concentración de N en la cebada fue de 2,9% y de 2,2% en la SF, coincidiendo con datos de cebada cultivada como cultivo comercial utilizando fertilizantes nitrogenados sintéticos (Arregui y Quemada, 2008). Estos datos confirman que, ya sea porque no había cantidad N suficiente en la zona superficial del suelo, N en el suelo superficial o porque las raíces alcanzaron horizontes más profundos, la cebada no sufrió una falta de N. El aumento de las fracciones de fibra al retrasar la fecha de matado está relacionada con una disminución en la fracción lábil. Los aumentos en la fracción de lignina sólo fueron significativas en la cebada en la primera temporada, pero esto no es sorprendente, ya que sólo hubo

tres semanas entre las fechas de matado, y el contenido de lignina es una variable menos sensible al cambio (Waggoner *et al.* 1989). Es interesante observar que en la temporada más seca (2011-2012), los residuos de cebada y mezcla tuvieron un contenido significativamente menor de fibra y lignina que en la temporada húmeda. Esta reducción en los años secos se señaló previamente en un estudio llevado a cabo durante varios años y localidades en el estado de Washington (Stubbs *et al.* 2009). En general, nuestros resultados confirmaron que el retraso de la fecha de matado no sólo proporcionó más residuos de CC, sino que además éstos fueron más recalcitrantes a la descomposición. Esto puede ser particularmente interesante cuando el objetivo buscado es la preservación de la humedad del suelo, el control de malas hierbas, o una mayor liberación lenta de N.

El N_0 del suelo también se vio afectado por la fecha de matado dos años después de comenzar el experimento. El aumento de N_0 en los tratamientos CC mostró que los CC contribuyen al aumento de materia orgánica lábil en el suelo. Los CC añadieron sustrato para los microorganismos del suelo durante su periodo de crecimiento, y la descomposición de residuos aumentó las fracciones lábiles de materia orgánica (Thorup-Kristensen *et al.* 2003). La tasa de mineralización de N, un parámetro que depende principalmente de las condiciones ambientales, no fue diferente entre los tratamientos y se encontraron dentro de los rangos que pueden encontrar en la literatura (Quemada y Díez, 2007).

En consonancia con otros estudios, los CC absorbieron la mayor parte del N inorgánico disponible en el suelo durante su periodo de crecimiento, disminuyendo así el riesgo de lixiviación de N con respecto al barbecho (Fig. 5). El retraso de la fecha de matado aumentó el riesgo de competencia, un efecto negativo que se refleja no sólo en las capas más profundas como es común (Gabriel y Quemada, 2011), pero también en las capas más superficiales. Una fecha de matado temprana permitió más tiempo para la liberación de N de los residuos de CC, y en el momento de FHS, más N estaba disponible en la capa superficial del suelo. Este efecto positivo de una fecha de matado temprana en la reducción de la competencia no se había mostrado antes.

Se puso de manifiesto el efecto de reciclaje del N en el sistema suelo-planta que tienen los CC: siendo capaces de absorber el N inorgánico de los horizontes más profundos y posteriormente liberarlo en las capas más superficiales (Thorup-Kristensen *et al.* 2003). El primer año, el N_{min} del suelo, se repuso en octubre gracias al N liberado tras la mineralización de los residuos. En la segunda temporada, en el mes de noviembre se observó diferencia de N_{min} en la distribución en el perfil del suelo: mientras que el N_{min} fue más abundante en capas más profundas en el tratamiento del barbecho, suponiendo un riesgo de pérdida por lixiviación durante el otoño e invierno; para el tratamiento de SF, el N_{min} se ubicó principalmente en las capas más superficiales, listo para ser absorbido por el próximo CC.

El uso de CC puede tener –a pesar de ese riesgo de competencia por N con el cultivo principal– un efecto positivo en muchos sistemas agrícolas ya que puede ayudar a controlar pérdidas de N. En un estudio de riego por goteo de

tomate, se observó que las elevadas concentraciones de N_{min} del suelo en el momento de siembra en primavera estaban vinculadas a grandes pérdidas por lixiviación tras el riego excesivo que se aplica para asegurar el establecimiento del cultivo (Vázquez *et al.* 2005). Este riego excesivo durante el periodo de establecimiento del cultivo puede representar hasta el 80% del total de las pérdidas por lixiviación de nitrato (Gabriel *et al.* 2011). Por lo tanto, manteniendo el N_{min} del suelo en niveles bajos y corrigiendo las necesidades de fertilizantes basados en el estado nutricional de los cultivos a lo largo de la campaña permitiría el control de las pérdidas de N y un aumento en la eficiencia de uso de N (Vázquez *et al.* 2006).

La biomasa aérea mayor observada para el tratamiento de SF afectó al CAS. El CC extrajo agua del suelo por la transpiración, aumentando las pérdidas por evapotranspiración en comparación con el barbecho (Gabriel *et al.* 2012). El agotamiento del agua del suelo se incrementó entre la primera y la segunda fecha de matado. Las diferencias de CAS en todo el perfil entre los tratamientos de CC y el barbecho fueron de más de 35 mm en la primera temporada y de 55 mm en la segunda. En el momento de segunda fecha de matado, el CAS en el tratamiento para PF fue similar al barbecho, mientras que para SF, la extracción de agua por parte de los CC se hizo evidente. En el momento de HFS y durante el resto del periodo de mulch, el efecto del tratamiento sobre la disponibilidad de agua fue diferente. Mientras que en la primera temporada no hubo diferencias, probablemente debido al riego que se aplicó, el CAS fue 60 mm menor en la SF que en los otros tratamientos durante la segunda temporada. Se encontraron resultados similares en California (Mitchell *et al.* 1999), donde se produjeron reducciones en el CAS en primavera de hasta 80 mm, debido a la extracción por los CC. En Minnesota, la diferencia en CAS en la parte superficial del suelo causada por un retraso de tres semanas en la fecha de matado de (de abril a mayo) fue de 27 mm (Krueger *et al.* 2011). Nuestros resultados confirmaron que un retraso del matado de CC aumentó la competencia por agua en comparación con un matado temprano. Dicho riego, podría ser mitigado en años lluviosos o con riego si el agua estuviera disponible. Un aspecto relevante de la mayor absorción de agua por parte del CC es el efecto sobre el CAS de las capas superficiales. La humedad en dichas capas es crucial en el momento de la siembra para asegurar el establecimiento del cultivo (Vázquez *et al.* 2005). En el presente estudio, la diferencia en el CAS entre los tratamientos de barbecho y el CC en la primera fecha de matado, debido al agotamiento del agua, osciló entre 13 a 19 mm en la capa superficial del suelo, y mejoró entre el barbecho y la SF por la segunda fecha de matado. Sin embargo, el efecto de acolchado del CC hizo que el CAS fuera mayor en las capas superficiales del tratamiento de PF en comparación con el barbecho, en el momento de FHS. El tratamiento de PF siempre aumentó la retención de agua en las capas superficiales con respecto al barbecho, pero el resultado dependió del año para el caso del tratamiento de SF. El CAS en capa

superior se vio influida por la absorción de agua CC durante el invierno, el efecto del acolchado por el residuo, y la cantidad de lluvia acumulada entre la fecha de matado del CC y la siembra del cultivo (Clark *et al.* 2007). Un experimento llevado a cabo en Maryland mostró que el retraso de la fecha de matado de un CC de veza produjo más biomasa y conservó la humedad del suelo en los horizontes superficiales (Clark *et al.* 1997). Sin embargo, otros experimentos recientes en Minnesota mostraron que el retraso de la fecha de matado provocó el agotamiento del CAS en esos mismos horizontes superficiales (Krueger *et al.* 2011). En Indiana, un matado temprano del CC mejoró la conservación de agua en la capa superficial del suelo (0,1 m). En los años de sequía, el CC produjo un aumento en el rendimiento del maíz, pero tuvo un impacto negativo en años húmedos debido a una disminución de la temperatura del suelo y el provocar un retraso en la fecha de siembra (Stipesevic y Kladvik, 2005). Nuestros resultados indicaron que un matado temprano del CC en primavera mejoró la humedad del suelo con respecto un matado tardío, en particular gracias al almacenaje del agua de lluvia recogido entre ambas fechas de matado.

Una de las críticas de este estudio podría ser que no se sembró un cultivo comercial después de los CC. Somos conscientes de la situación, pero creemos que este tipo de conjunto de datos era necesario para avanzar en nuestra comprensión del complejo efecto de la fecha de matado de los CC en otras variables. Separar los efectos nos podría permitir la calibración de los parámetros clave y simular de forma apropiada ambos procesos. La fecha de matado es una herramienta de manejo que permitiría regular los efectos de la CC sobre muchas variables ambientales: en ambientes secos, el conservar la humedad residuo es el objetivo principal de los CC (Clark *et al.* 2007) mientras que el riesgo de retrasar la siembra debido a los suelos que son demasiado húmedos es una preocupación importante en climas más fríos (Stipesevic y Kladvik, 2005). Por último, a pesar de que CC pueden agotar el N del suelo y crear una competencia con el siguiente cultivo (Thorup- Kristensen *et al.* 2003), también permiten controlar las pérdidas de N y crear oportunidades para una aplicación más racional de fertilizantes (Gabriel *et al.* 2012). Nuestro trabajo no pretende cerrar el debate sobre la fecha de matado, sino contribuir a una toma de decisiones más racional para el uso de los CC.

5.- Conclusiones

La fecha de matado es una herramienta de manejo de los CC que puede conducir al aumento en la eficiencia de uso del agua y del N, y a reducir las pérdidas de N y la competencia con el cultivo posterior. La cobertura del suelo de CC fue superior al 80% en la primera fecha. El principal efecto de retrasar la fecha de matado fue un aumento de la biomasa aérea. El aumento en la el contenido de N entre las fechas de matado se debió principalmente a la absorción de N por parte de la cebada, en los horizontes profundos del suelo.

El retraso de la fecha de matado proporcionó más residuos de CC más resistente a la descomposición, por lo que son más adecuados para proteger el suelo y aumentar la liberación lenta de N.

La fecha de matado temprana disminuyó el riesgo de la competencia al permitir más tiempo para la liberación de N por los residuos. El CC fue capaz de extraer el N inorgánico de las capas más profundas del suelo para luego liberarlo en la capa superficial del suelo a través de la mineralización de los residuos, disminuyendo así el riesgo de lixiviación de nitratos y potenciando un reciclado de los nutrientes en el suelo.

Una fecha temprana de matado redujo igualmente la competencia por agua, debido a la preservación del agua de lluvia recogida entre las fechas de matado. Los residuos del CC cubriendo el suelo tras el matado formando un mulch sobre la superficie del suelo, permitieron conservar la humedad del suelo.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyecto AGL2014-52310-R) y de la Comunidad de Madrid (proyecto AGRISOST, S2013/ABI-2717). Agradecemos también al personal de la estación experimental de la Chimenea (IMIDRA) por su ayuda.

6.- Bibliografía

- Alonso-Ayuso, M, Gabriel, JL, y Quemada, M, 2014. The kill date as a management tool for cover cropping success. *Plos One* 9(10), e109587. doi:10.1371/journal.pone.0109587.
- Arregui, LM, y Quemada, M, 2008. Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions. *Agronomy Journal* 100, 277-284.
- Benincasa, P, Tosti, G, Tei, F, y Guiducci, M, 2010. Actual N Availability from Winter Catch Crops Used for Green Manuring in Maize Cultivation. *Journal of Sustainable Agriculture* 34, 705-723.
- Bodner, G, Himmelbauer, M, Loiskandl, W, y Kaul HP, 2010. Improved evaluation of cover crop species by growth and root factors. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 455-464.
- Clark, AJ, Decker, AM, Meisinger, JJ, McIntosh, MS, 1997. Kill date of vetch, rye, and a vetch-rye mixture: 2. Soil moisture and corn yield. *Agronomy Journal* 89, 434-441.
- Clark, AJ, Meisinger, JJ, Decker, AM, y Mulford, FR, 2007. Effects of a grass selective herbicide in a vetch-rye cover crop system on corn grain yield and soil moisture. *Agronomy Journal* 99, 43-48.
- Crooke, WM, y Simpson, WE, 1971. Determination of ammonium in Kjeldahl digests of crops by an automated procedure. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 22, 9-10.
- Gabriel, JL, y Quemada, M, 2011. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: Yield, N uptake and fertilizer fate. *European Journal of Agronomy* 34, 133-143.
- Gabriel, JL, Lizaso, JJ, y Quemada, M, 2010. Laboratory versus field calibration of capacitance probes. *Soil Science Society of America Journal* 74, 593-601.
- Gabriel, JL, Muñoz-Carpena, R, y Quemada, M, 2012. The role of cover crops in irrigated systems: Water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. *Agriculture Ecosystems & Environment* 155, 50-61.
- Goering, HK, y Van Soest, PJ, 1970. Forage fiber analysis: apparatus, reagents, procedures, and some applications. USDA Agr Hbk 379. US Government Printing Office. Washington D.C.
- Keeney, DR, y Nelson, DW, 1982. Nitrogen-inorganic forms. In: Page AL, editor. *Methods of soil analysis Part 2: Chemical and microbiological properties*. Madison, WI, USA: ASA and SSSA. 643-698.
- Krueger, ES, Ochsner, TE, Porter, PM, y Baker, JM, 2011. Winter Rye Cover Crop Management Influences on Soil Water, Soil Nitrate, and

- Corn Development. *Agronomy Journal* 103, 316-323.
- Mitchell, JP, Peters, DW, y Shennan, C, 1999. Changes in soil water storage in winter fallowed and cover cropped soils. *Journal of Sustainable Agriculture* 15, 19-31.
- Nelson, DW, y Sommers, LE, 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Sparks D, editor. *Methods of soil analysis, part 3: chemical methods*. Madison, WI, USA: ASSA and SSSA, 961-1010.
- Ofori, F, y Stern, WR, 1987. The combined effects of nitrogen-fertilizer and density of the legume component on production efficiency in a maize cowpea intercrop system. *Field Crops Research* 16, 43-52.
- Papadakis, J, 1966. *Climates of the world and their agricultural potentialities*. Rome, Italy: DAPCO.
- Quemada, M, y Cabrera, ML (2002) Characteristic moisture curves and maximum water content of two crop residues. *Plant and Soil* 238: 295-299.
- Quemada, M, y Diez, JA, 2007. Available nitrogen for corn and winter cereal in Spanish soils measured by electro-ultrafiltration, calcium chloride, and incubation methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38, 2061-2075.
- Ramírez-García, J, Almendros, P, y Quemada, M, 2012. Ground cover and leaf area index relationship in a grass, legume and crucifer crop. *Plant Soil and Environment* 58, 385-390.
- Ramírez-García, J, Gabriel, JL, Alonso-Ayuso, M, y Quemada, M, 2014. Quantitative characterization of five cover crop species. *Journal of Agricultural Science*. doi:10.1017/S0021859614000811.
- Richardson, MD, Karcher, DE, y Purcell, LC, 2001. Quantifying turfgrass cover using digital image analysis. *Crop Science* 41, 1884-1888.
- Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12^a ed. Washington, DC, USA: USDA, Natural Resources Conservation Service.
- Stanford, G, y Smith, SJ, 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 36, 465-472.
- Stipesevic, B, y Kladivko, EJ, 2005. Effects of winter wheat cover crop desiccation times on soil moisture, temperature and early maize growth. *Plant Soil and Environment* 51, 255-261.
- Stubbs, TL, Kennedy, AC, Reisenauer, PE, y Burns, JW, 2009. Chemical composition of residue from cereal crops and cultivars in dryland ecosystems. *Agronomy Journal* 101, 538-545.
- Thorup-Kristensen, K, Magid, J, y Jensen, LS, 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy* 79, 227-302.
- Tonitto, C, David, MB, y Drinkwater, LE, 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112, 58-72.
- Tosti, G, Benincasa, P, y Guiducci, M, 2010. Competition and Facilitation in Hairy Vetch-Barley Intercrops. *Italian Journal of Agronomy* 5, 239-248.
- Tosti, G, Benincasa, P, Farneselli, M, Pace, R, y Tei, F, 2012. Green manuring effect of pure and mixed barley-hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition. *European Journal of Agronomy* 43, 136-146.
- Tosti, G, Benincasa, P, Farneselli, M, Tei, F, Guiducci, M, 2014. Barley-hairy vetch mixture as cover crop for green manuring and the mitigation of N leaching risk. *European Journal of Agronomy* 54, 34-39.
- Unkovich, M, Herridge, D, Peoples, M, Cadisch, G, y Boddey, B, 2008. *Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems*. Canberra, Australia: Australian Centre for International Agricultural Research. 258 p. 24.
- Vázquez, N, Pardo, A, Suso, ML, y Quemada, M, 2005. A methodology for measuring drainage and nitrate leaching in unevenly irrigated vegetable crops. *Plant and Soil* 269, 297-308.
- Vázquez, N, Pardo, A, Suso, ML, y Quemada, M, 2006. Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture Ecosystems & Environment* 112, 313-323.
- Waggar, MG, 1989. Time of desiccation effects on plant composition and subsequent Nitrogen release from several winter annual cover crops. *Agronomy Journal* 81, 236-241.
- Waggar, MG, Cabrera, ML, y Ranells, NN, 1998. Nitrogen and carbon cycling in relation to cover crop residue quality. *Journal of Soil and Water Conservation* 53, 214-218.